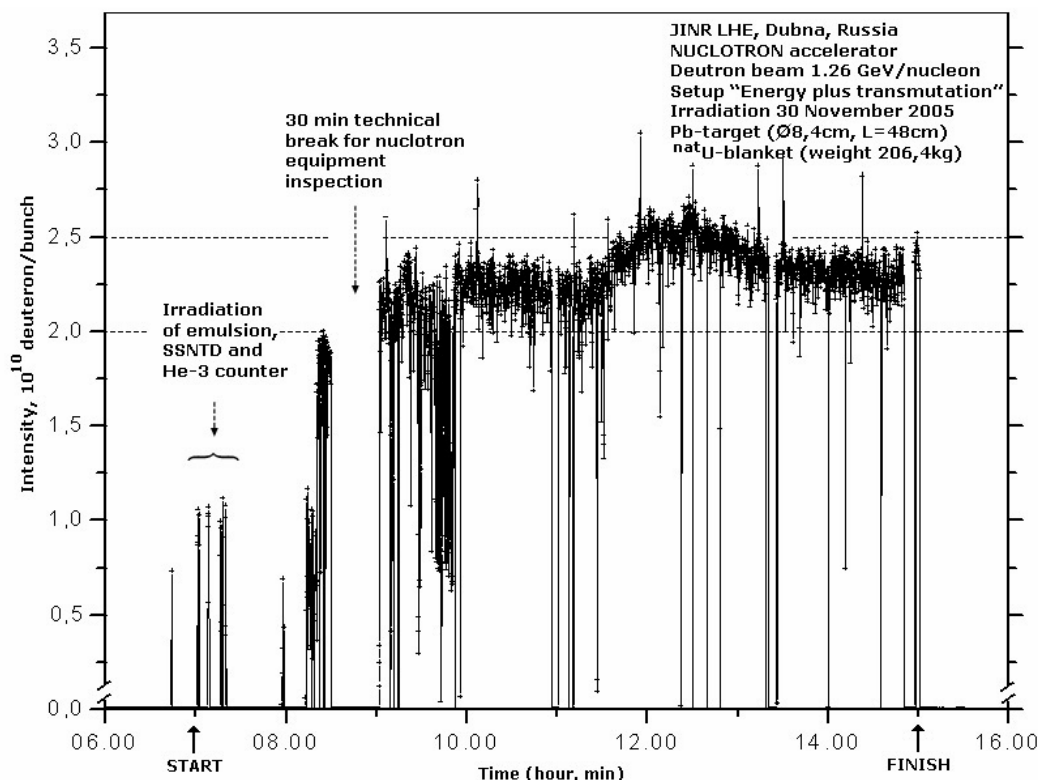


4.3 Eksperyment 2,52 GeV - wiązka deuteronów [25], [26], [31], [48], [49], [50]

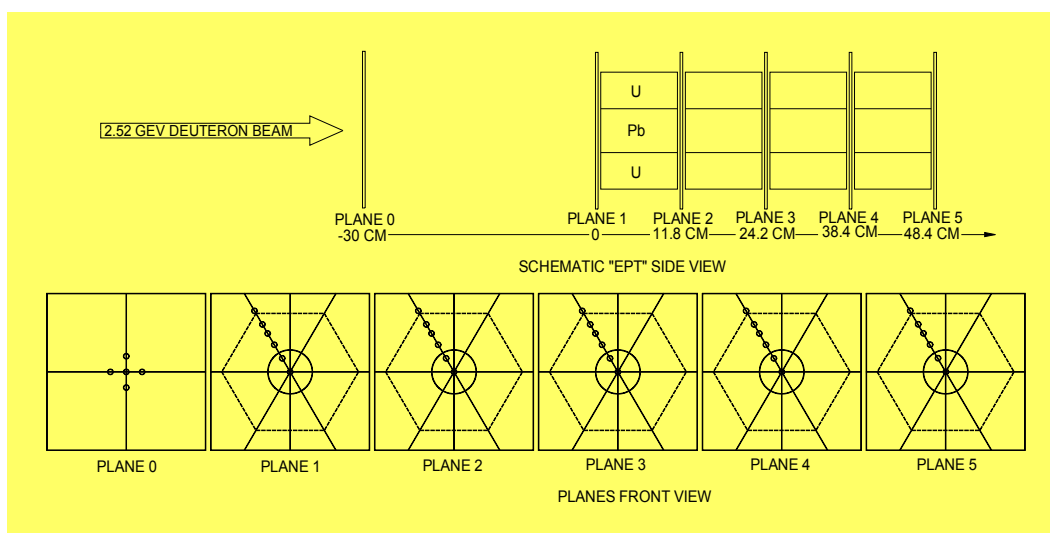
Po poprzednim eksperymencie z użyciem próbek Y-89 i analizie uzyskanych rezultatów, zaobserwowano niedostatek danych z większych odległości radialnych z innych płaszczyzn niż z drugiej. Nie można ekstrapolować posiadanych rezultatów rozkładu neutronów o energiach powyżej 50 MeV, gdyż w ich przypadku zbyt duży jest wpływ strumienia neutronów z wiązki z akceleratora (patrz rozdziale 4.2). Postanowiono zwiększyć znacznie liczbę detektorów i rozmieścić je w taki sam sposób na każdej płaszczyźnie pomiarowej, jak wcześniej na płaszczyźnie drugiej. Na wszystkich płaszczyznach umieszczono dodatkowe próbki dokładnie na osi zestawu, czyli wzdłuż wiązki z akceleratora. Dzięki temu można uzyskać trójwymiarowe rozkłady neutronów o różnych energiach w całym zestawie. Planowano zbadać również rozkład kątowy neutronów o wyższej energii (pierwotnych), czyli tych wyprodukowanych pod wpływem cząstek ze strumienia z akceleratora. Ich rozkład powinien być związany z kierunkiem strumienia i rozszerzać się w kierunku końca naszego zestawu. Uzyskano rozkłady produkcji izotopów z reakcji (n,xn) dla Y-88, Y-87 i Y-86, ale dla pozostałych izotopów Y-85 i Y-84 wyniki były niekompletne (dotyczyło to przede wszystkim detektorów umieszczonych w większej odległości od czoła i osi modelu). Jeszcze gorsza sytuacja była z identyfikacją izotopów Kr-77, Br-77 i Se-73, które to miały nam posłużyć do identyfikacji neutronów o wysokich energiach tak jak to zrobiono po poprzednim eksperymencie (Rys. 4.7, 4.8 i 4.9). Przyczyną była zbyt duża liczba detektorów. Grupa polska i czeska wykonuje pomiary po eksperymencie na jednym spektrometrze germanowym. Obie grupy muszą podzielić się dostępnym czasem na spektrometrze, w taki sposób, by jak największa ilość detektorów została pomierzona w jak najkrótszym czasie, aby móc zidentyfikować izotopy krótko żyjące. W sytuacji, gdy zwiększyliśmy liczbę naszych detektorów ponad 3 krotnie, nie można było mierzyć każdej próbki wystarczająco długo. Skutecznie można było wykryć tylko najsilniejsze linie od niektórych izotopów. Rozwiązaniem tego problemu byłby dodatkowy spektrometr, który można by użyć tylko do pomiarów Itru.

Był to pierwszy eksperyment, w którym użyto tak dużej ilości itrowych detektorów rozmieszczonych równomiernie na wszystkich płaszczyznach. Był to też pierwszy eksperyment, w którym zmieniono wiązkę z akceleratora, z protonów na deuterony. W związku ze zmianą wiązki nie spodziewano się istotnych różnic w wynikach. Wniosek ten oparto na danych dotyczących różnic w produkcji neutronów w ciężkich tarczach pod wpływem wiązki protonowej lub deuteronowej [51]. Według tych danych dla energii wiązki powyżej 200MeV nie powinno być żadnych widocznych różnic. Okazało się jednak inaczej.

Eksperyment wykonano 30-go listopada 2005 roku, na modelu 4-o sekcyjnym [49]. Wiazka deuteronów o energii 2,52 GeV była doprowadzana z Nuklotronu. Naświetlanie wiązką zestawu trwało 21600 sekund, co umożliwiło zebranie $6,45 \cdot 10^{12}$ deuteronów. Charakterystykę wiązki deuteronów przed i w trakcie eksperymentu możemy zobaczyć na rysunku 4.14. Detektory aktywacyjne były umieszczone, tak jak poprzednio, na pięciu foliach rozmieszczonych z przodu, z tyłu i pomiędzy sekcjami uranowymi (Rys.4.15). Na każdej folii znajdowało się 6 próbek w identycznych odległościach radialnych od osi zestawu (0; 3; 6; 8.5; 10.5 i 13.5 cm). Dodatkowo umieszczono 5 próbek na folii zlokalizowanej 30 cm przed zestawem, rozmieszczonych w kształcie krzyża na osi zestawu i osi wiązki z akceleratora. Na folii tej znajdowały się też inne detektory służące do monitorowania kształtu, zbieżności i intensywności wiązki deuteronowej wykonane z folii aluminiowej [23].



Rys. 4.14 Profil intensywności wiązki deuteronów o energii 2,52 GeV przed i w czasie eksperymentu [26]. Pierwszy krótki fragment wiązki był wykorzystany podczas pomiarów detektorem helowym. Drugi był próbą podniesienia intensywności wiązki. Trzeci, najdłuższy, był właściwym okresem eksperymentu. Dane takie jak ten wykres, otrzymywano od obsługi technicznej akceleratora po każdym eksperymencie.



Rys.4.15 Rozmieszczenie próbek Y-89 na poszczególnych foliach z detektorami (F0-F5). Na każdej folii oprócz F0, próbki zostały rozmieszczone w ten sam sposób [49].

Po eksperymencie próbki zostały przewiezione do drugiego laboratorium, gdzie za pomocą spektrometru germanowego wykonano pomiary widm gamma. Analizę widm

wykonano za pomocą programu DEIMOS [35]. W tym eksperymencie udało się dobrze określić parametry linii widmowych znacznie mniejszej liczby izotopów. W wielu przypadkach błędy wyznaczenia linii sięgały nawet 100% lub nie udało się wcale zidentyfikować danej linii (Tab. 4.6). Główną przyczyną był krótszy czas, jaki można było przeznaczyć na pomiar każdej próbki w ciągu pierwszej doby od eksperymentu, przez co większość pomiarów była zbyt krótka aby wyznaczyć poszukiwane linie z dobrą dokładnością (błąd mniejszy niż 20%). Drugim czynnikiem była mniejsza masa próbek. W poprzednim eksperymencie próbki miały większą masę, ale bardziej nieregularne kształty. W obecnym próbki były wykonane ze sprasowanego pyłu itrowego. Miały regularny kształt małych cylindrów o grubości około 1-2 mm. Lista izotopów jakie udało się zidentyfikować we wszystkich lub prawie wszystkich próbkach przedstawia Tabela 4.5. Są to 3 izotopy itru (Y-88, Y-87, Y-86) oraz Br-77 dla którego podano 3 możliwe reakcje jego wytwarzania i ich wyliczoną [8] energię progową. Najbardziej prawdopodobną reakcją jest ta wymagająca najmniejszej energii. Wysokie błędy pomiarowe dotyczą przede wszystkim próbek umieszczonych w większych odległościach radialnych i większej odległości od czoła zestawu eksperymentalnego. W tych pozycjach aktywność próbek po naświetlaniu była najmniejsza.

Nr	Reakcja	Nowy izotop	Czas rozpadu T/2	Energia progowa [Mev]	Energja linii gamma [keV]	Względna Intensywność linii [%]
1	(n,2n)	Y-88	106,65d	11,5	898,0	93,7
					1836,1	99,2
2	(n,3n)	Y-87	79,8h	20,8	388,5	82,00
					484,8	89,7
3	(n,4n)	Y-86	14,74h	32,7	13,37h	78
					14,74h	32,7
3	(n,4n)	Y-86	14,74h	32,7	627,7	32,6
					703,3	15,4
					777,4	22,4
					1076,6	82,00
					1153,0	30,50
					1854,4	17,2
					1920,7	20,8
4	(n,5n2α) (n,2p7n1α) (n,4p9n)	Br-77	57,036h	52,2 80,84 109,49	239,0	23
					520,6	22,4

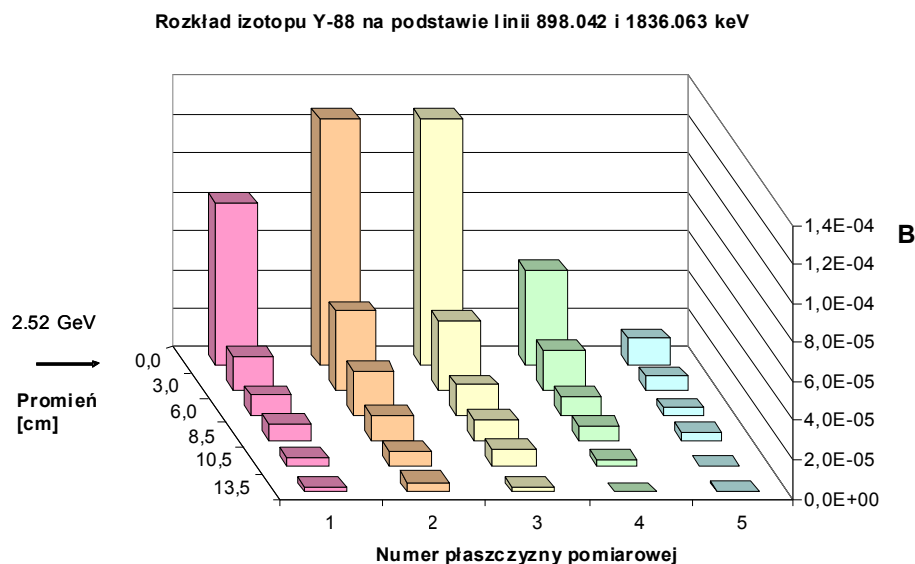
Tab. 4.5 Zestawienie wyznaczonych izotopów, wraz z ich liniami gamma, w eksperymencie z wiązka deuteronów o energii 2,52 GeV. W tabeli podano też minimalną energię jaką musi posiadać neutron aby doszło do reakcji [8], [49].

Po identyfikacji linii przeprowadzono standardową obróbkę danych w wyniku, której otrzymano rezultaty (wraz z błędami) zaprezentowane w tabeli 4.6. Do wyliczenia pokazanych rezultatów użyto wyników tylko z niektórych linii widmowych, które udało się zmierzyć z niewielkimi błędami pomiarowymi. Dla Y-88 wykorzystano obie linie (898 i 1836,1 keV), dla Y-87 pozostawiono dwie linie (388,5 i 484,8 keV) rezygnując z jednej. Natomiast dla Y-86 wykorzystano tylko jedną z 7-u linii użytych przy identyfikacji (1076,0 keV). Uzyskane wyniki przedstawiono za pomocą 3 wymiarowego wykresu (Rys. 4.16, 4.17, 4.18), który pokazuje zmiany produkcji izotopu jednocześnie wzdłuż modelu i z odległością radialną od osi modelu. Wykresy te w pełni pokazują zalety takiego rozłożenia i ilości próbek

jakie zostały zastosowane w tym eksperymencie. Bez żadnych przybliżeń mamy obrazy ukazujące wartość produkcji danego izotopu w całym przekroju zestawu eksperymentalnego.

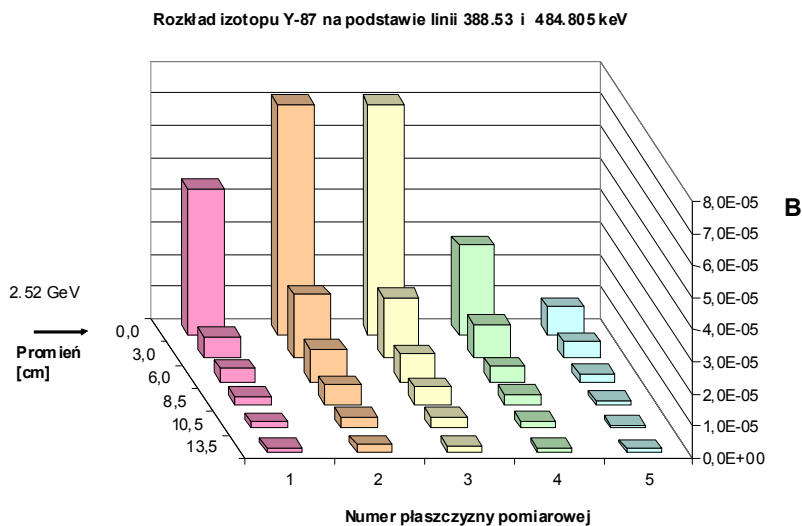
Izotopy Y89, Czas $T_{1/2}$, Użyte linie γ	Odległość radialna [cm]	Odległość od czola modelu [cm]				
		0.0	11.8	24.0	36.2	48.4
^{88}Y $T_{1/2}=106.65$ d, $E\gamma=898.0$ and 1836.0 keV	0.0	8.34 (60)	12.70 (40)	12.7 (17)	4.87 (12)	1.37 (50)
	3.0	1.77 (11)	4.10 (40)	3.58 (12)	2.04 (13)	0.70 (80)
	6.0	1.03 (10)	2.25 (80)	1.56 (30)	0.99 (20)	0.38 (12)
	8.5	0.87 (20)	1.26 (50)	1.07 (20)	0.74 (90)	0.37 (50)
	10.5	0.38 (11)	0.74 (17)	0.82 (30)	0.28 (19)	---
	13.5	0.2 (50)	0.50 (40)	0.30 (10)	---	0.07 (60)
^{87}Y $T_{1/2}=3.32$ d $E\gamma=388.5$ and 484.8 Kev	0.0	4.55 (50)	7.17 (13)	7.18 (40)	2.78 (80)	0.87 (80)
	3.0	0.69 (40)	1.99 (11)	1.89 (21)	1.05 (10)	0.51 (30)
	6.0	0.41 (10)	1.02 (50)	0.84 (30)	0.48 (50)	0.25 (30)
	8.5	0.26 (11)	0.61 (30)	0.54 (13)	0.32 (20)	0.16 (10)
	10.5	0.19 (40)	0.38 (70)	0.38 (90)	0.23 (70)	0.11 (10)
	13.5	0.13 (30)	0.22 (40)	0.21 (20)	0.14 (90)	0.07 (50)
^{86}Y $T_{1/2}=0.614$ d $E\gamma=1076.0$ keV	0.0	1.89 (13)	2.67 (10)	3.02 (15)	1.26 (80)	0.40 (27)
	3.0	0.22 (15)	0.57 (40)	0.69 (30)	0.35 (25)	0.18 (14)
	6.0	0.14 (17)	0.30 (22)	0.29 (30)	0.18 (17)	0.09 (13)
	8.5	0.10 (23)	0.17 (16)	0.18 (21)	0.13 (11)	0.06 (80)
	10.5	0.08 (19)	0.09 (10)	0.13 (16)	0.08 (15)	0.05 (10)
	13.5	0.04 (13)	0.06 (80)	0.07 (10)	0.06 (13)	0.03 (60)

Tab. 4.6 Wartości parametru $B \cdot 10^5$ (czyli wielkość produkcji danego izotopu na 1g i 1 deutron z wiązki) podane dla wszystkich próbek umieszczonych w zestawie. Kreska oznacza nie wykrycie izotopu w próbce. W nawiasach podano błąd pomiarowy. W niektórych przypadkach błąd pomiarowy jest bardzo duży (wyjaśniono to powyżej w treści pracy). [26].

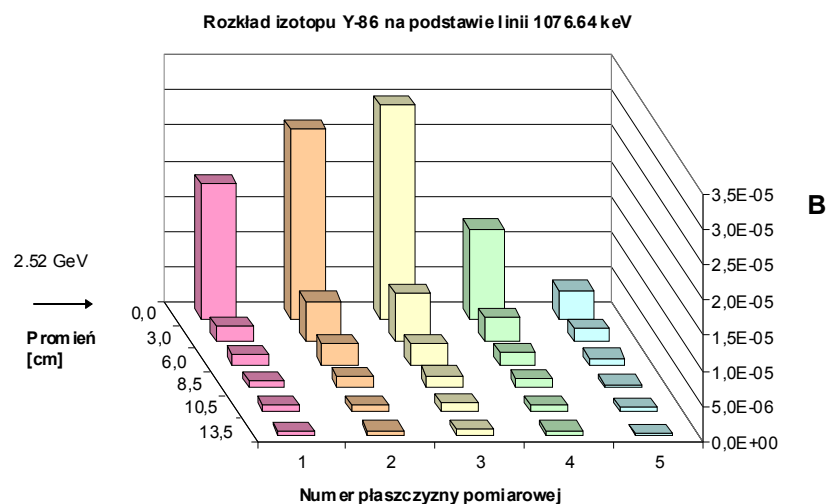


Rys. 4.16 Rozkład przestrzenny produkcji izotopu Y-88 (parametr B) w całym zestawie E+T [26]. Oś X odległość od czola zestawu. Oś Y odległość radialna od osi zestawu.

Na wszystkich rysunkach można zauważyć pewną zmianę w stosunku do poprzednich eksperymentów z wiązką protonową. Maksimum produkcji danego izotopu wyraźnie przesunęło się bardziej w głąb modelu w okolice trzeciej płaszczyzny, czyli odległości około 20cm. Wcześniej zawsze wypadalo w okolicy 11-12 cm od czoła modelu. Można wyrazić przypuszczenie, że zmiana wiązki na deuteronową być może nie była całkowicie obojętna na wyniki eksperymentów. Było to niezgodne z naszymi przypuszczeniami popartymi danymi z innych prac [51]. Również, żadne symulacje przeprowadzone przed eksperymentem z użyciem kodów MCNPX [50], [52] jak i innych kodów nie pokazały tego zjawiska. Przypuszczano, że prawdopodobną przyczyną tych rozbieżności wyników eksperymentalnych i teoretycznych mogą być nieprawidłowo określone przekroje czynne na reakcję z deuterem, które zostały użyte do obliczeń. Fakt tego przesunięcia próbowaliśmy wyjaśnić następującym rozumowaniem. Deuteron oprócz protonu składa się z neutronu. Po pierwszym zderzeniu może on ulec rozbiciu w wyniku którego otrzymujemy bardzo wysoko energetyczne neutrony, które ze względu na brak oddziaływań kulombowskich mogą głębiej wnikać w nasz model niż protony, i co za tym idzie przesunąć punkt maksymalnej produkcji izotopów.

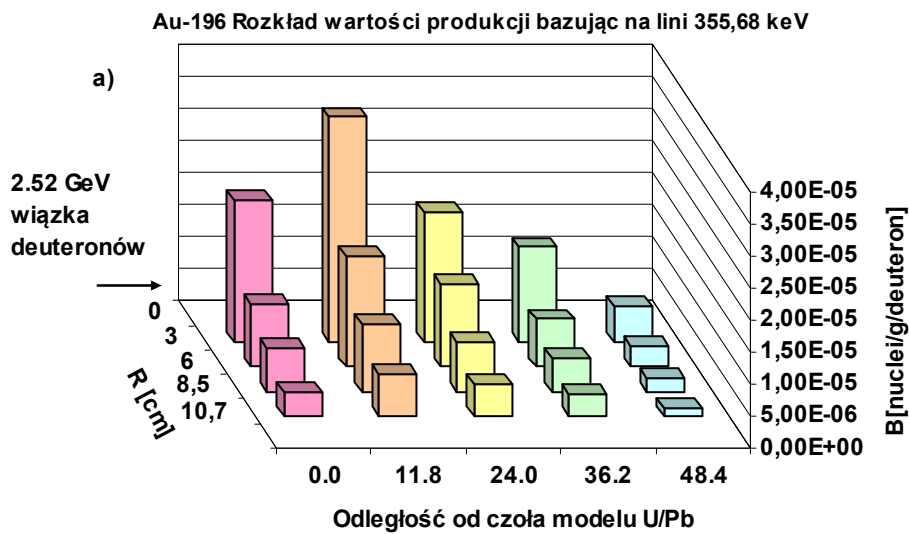


Rys.4.17 Rozkład przestrzenny produkcji izotopu Y-87 (parametr B) w zestawie E+T [26]. Oś X odległość od czoła zestawu. Oś Y odległość radialna od osi zestawu.

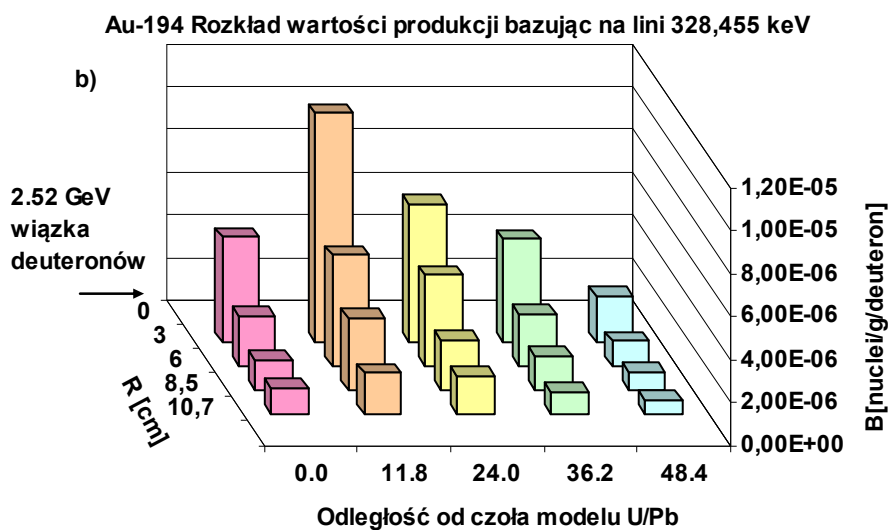


Rys.4.18 Rozkład przestrzenny produkcji izotopu Y-86 (parametr B) w zestawie E+T [26]. Oś X odległość od czoła zestawu. Oś Y odległość radialna od osi zestawu.

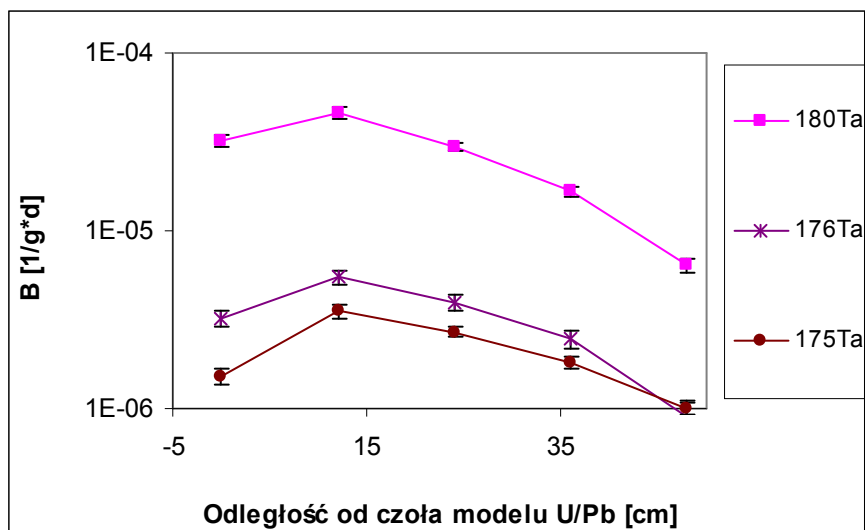
Wyjaśnienie to nie jest jednak prawidłowe. Nie było żadnego nowego efektu tylko nieoczekiwany błąd pomiarowy. Hipoteza dokładniej wyjaśniająca ten efekt znajduje się w rozdziale 4.6. Poniżej dla porównania przedstawiono wyniki rozkładu produkcji izotopów uzyskaną poprzez analizę detektorów wykonanych ze złota. Detektory umieściła, mierzyła i analizowała grupa czeska a prezentowane wyniki są oparte na rezultatach uzyskanych przez Ondreja Swobodę [5]. Rysunki 4.19 i 4.20 przedstawiają rozkład produkcji dwóch izotopów złota Au-196 i Au-194 [5]. Na rysunku 4.21 pokazany jest rozkład trzech izotopów pochodzących z nowego typu detektora, który zaczęła stosować w tym eksperymencie grupa Czeska - tantal Ta-181. Na tych rysunkach nie widać nietypowego przesunięcia maksimum. Jednak w tamtym okresie nie podejrzewaliśmy jeszcze błędu, gdyż podobne przesunięcie zaobserwowała też grupa białoruska, co nas wtedy wprowadziło w błąd. Wszystkie grupy czekały na wyniki następnego eksperymentu, który mógłby pomóc w wyjaśnieniu tych rozbieżności.



Rys. 4.19 Rozkład przestrzenny produkcji izotopu Au-196 (parametr B) w zestawie E+T [5]. Oś X odległość od czoła zestawu [cm]. Oś Y odległość radialna od osi zestawu [cm].

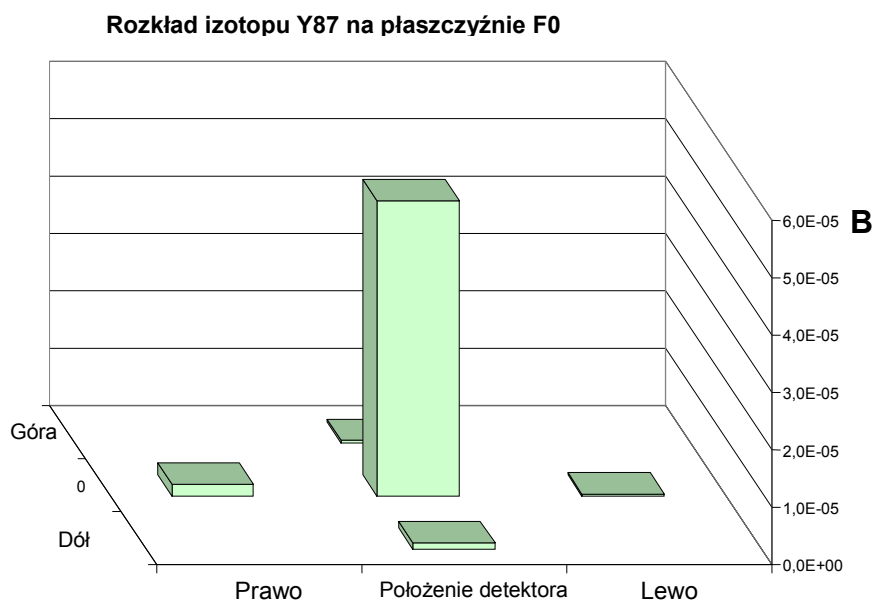


Rys. 4.20 Rozkład przestrzenny produkcji izotopu Au-194 (parametr B) w zestawie E+T [5]. Oś X odległość od czoła zestawu [cm]. Oś Y odległość radialna od osi zestawu [cm].



Rys. 4.21 Rozkład osiowy produkcji izotopów tantalum Ta-180, Ta-176 i Ta-175 (parametr B) w odległości 3cm od osi zestawu E+T [5]

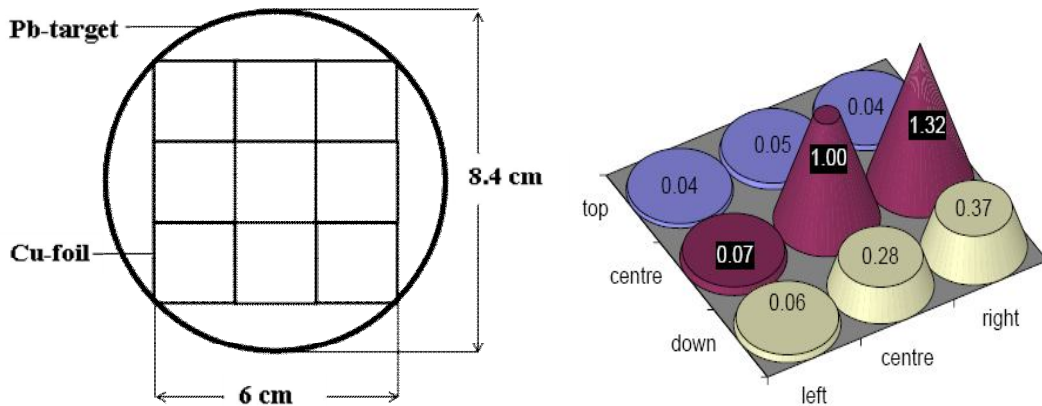
Na dodatkowej płaszczyźnie pomiarowej (30cm przed zestawem eksperymentalnym) znajdowały się dodatkowe detektory monitorujące wiązkę z akceleratora. Przeprowadzona została analiza tych próbek. Na podstawie rezultatów uzyskanych z próbek umieszczonych przez grupę polską, można stwierdzić, że wiązka była nieznacznie odchylna w prawo i w dół zestawu (patrz rysunek 4.22). Ponieważ odstęp między tymi detektorami wynosiły 3cm, a średnica wiązki deuteronów jest podobnej wielkości, nie można tego określić dokładnie. Dokładniejsze analizy przeprowadzono analizując inne monitory wiązki.



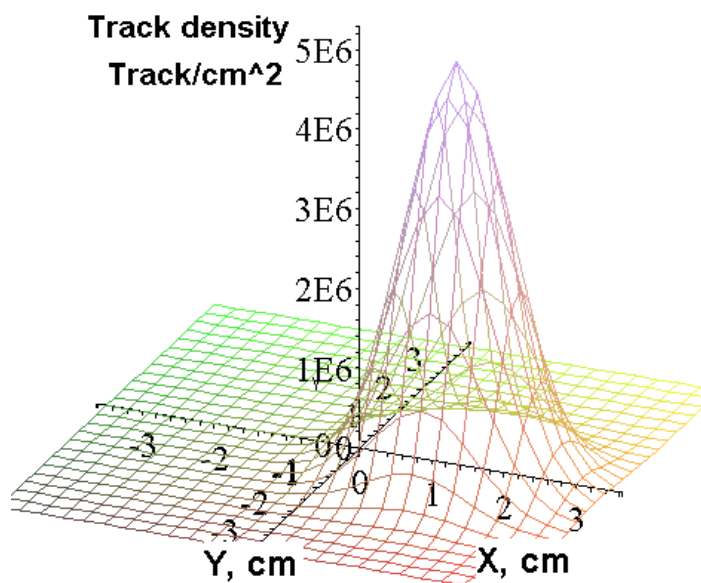
Rys. 4.22 Próbkę Y-89 umieszczono 30cm przed zestawem E+T. Widać odchylenie wiązki z akceleratora od osi w prawo i w dół. Odległość próbek od siebie 3cm [26].

Wyniki uzyskane przez monitory innych grup potwierdziły przesunięcie wiązki w tym samym kierunku. Czeski monitor wykonany z miedzi i aluminium, składający się z 9-u

kwadratów 2x2 cm przylegających do siebie (Rys. 4.23) pokazał wyraźną odchyłkę w tym samym kierunku [31]. Wykazano, że strumień był odchyłony 1,5 cm w prawo i 0,3 cm w dół. Dokładny profil i kształt tej odchyłki pokazała z kolei grupa z Białorusi [25], wykorzystując technikę detektorów śladowych w stałej folii (Solid State Nuclear Track Detector- SSNTD) (Rys. 4.24). Wyliczono że, 95% deuteronów pada na elipsę o wymiarach 2,6x2,8cm. Środek elipsy wypada dla podobnych wartości jakie wyznaczyli Czesi.



Rys. 4.23 Czeski Al-Cu monitor oraz odchyłka strumienia deuteronów jaką wykazał [31].



Rys. 4.24 Rozkład 3D wiązki deuteronów na podstawie białoruskiej analizy SSNTD [25].

Grupa białoruska wyznaczyła dodatkowo za pomocą analizy wyników SSNTD liczbę deuteronów jakie padły na nasz zestaw w ciągu całego eksperymentu. Wartość ta wyniosła $5,9 \times 10^{12}$, jednak obliczenia grupy czeskiej wykonane za pomocą monitora aluminiowego dały nieco inną wartość, a mianowicie $6,4 \times 10^{12}$. Różnica ta rzędu 10-u procent oraz odchyłki wiązki deuteronów padające z Nuklotronu względem osi naszego zestawu, pozwalają wnioskować, że wyznaczone wartości łącznej liczby deuteronów z wiązki, są obarczone błędami, rzędu 10-20%. Wartość ta, jak zostało to wspomniane w poprzednich rozdziałach, ma bardzo duże znaczenie dla wyznaczenia wartości parametru B.